

文章编号:1000-4653(2026)02-0144-09

航运温室气体减排分析模型及燃料路径分析

郝金凤, 赵仲秋*, 强兆新, 张成舜, 李忠刚, 白玉刚

(中船重工船舶设计研究中心有限公司, 北京 100081)

摘要:为应对全球气候变化,实现国际海事组织(IMO)温室气体减排目标,全球船队在能源转型与燃料路径选择上面临减排效果与经济平衡的复杂性挑战,对船队级减排路径的系统性评估与优选提出了更高要求。现有研究在面向多燃料路径的综合对比分析方面仍存在不足,尤其缺乏兼顾减碳效果与成本效益的系统性比较,难以有效支撑船队减碳路线的科学决策。针对上述问题,本文提出一种基于技术经济性分析的航运温室气体减排路径评估与优选方法。首先,以全球船队为研究对象,基于预设的18种燃料路径,对各路径下的碳减排量和减碳成本进行量化建模与特征提取;其次,构建兼顾减碳效果与经济性的综合评价指标,以应对多燃料路径之间在减排潜力与成本约束上的耦合比较;并结合情景分析与路径优选机制,形成完整的技术评估框架。结果表明,以甲醇为主的路径减碳成本最低,氨路径略次之,以绿甲醇为主的路径优于液化天然气为主的路径;绿甲醇和氨燃料路径减碳效果最优;基于中远期考虑,绿甲醇和绿氨可作为最优燃料选择,为全球船队温室气体减排路线规划与燃料转型决策提供了可行的技术途径。

关键词:绿色航运;燃料路径优选;技术经济性分析;全球船队;甲醇燃料;氨燃料

中图分类号:U663 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-4653.2026.02.017

Shipping greenhouse gas emission reduction model and fuel path analysis

Hao Jinfeng, Zhao Zhongqiu*, Qiang Zhaoxin, Zhang Chengshun, Li Zhonggang, Bai Yugang

(China Ship Design and Research Center Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: To address global climate change and achieve the greenhouse gas reduction targets set by the International Maritime Organization (IMO), the global fleet faces complex challenges in balancing emission reduction effectiveness and economic feasibility during energy transition and fuel pathway selection, necessitating more systematic assessment and optimization of fleet-level emission reduction pathways. Existing research still lacks comprehensive comparative analysis of multi-fuel pathways, particularly systematic comparisons that balance carbon reduction effects and cost-effectiveness, making it difficult to support scientific decision-making for fleet decarbonization routes. To address these issues, a technology-economic assessment method for evaluating and optimizing shipping greenhouse gas reduction pathways is proposed. First, taking the global fleet as the research object, quantitative modeling and feature extraction of carbon reduction amounts and costs are conducted for each of the 18 preset fuel pathways. Second, a comprehensive evaluation index is established to account for both carbon reduction effects and economic feasibility, enabling coupled comparisons of multiple fuel pathways in terms of emission reduction potential and cost constraints. Combined with scenario analysis and pathway optimization mechanisms, a complete technical assessment framework is formed. The results indicate that pathways primarily based on methanol have the lowest carbon reduction costs, followed by ammonia pathways, while green methanol pathways outperform Liquefied Natural Gas (LNG)-based pathways. Green methanol and ammonia fuel pathways demonstrate the best carbon reduction performance. Considering medium-to long-term perspectives, green methanol and green ammonia can serve as optimal fuel choices, providing a feasible technical pathway for global fleet greenhouse gas

收稿日期:2025-01-14

基金项目:工业和信息化部“绿色生态环保船工程专项”(CB01N20-05)资助

作者简介:郝金凤(1978—),女,高级工程师,研究方向为船舶与海洋工程。*通信作者:zhaozhongqiu@csdc.cn

引用格式:郝金凤,赵仲秋,强兆新,等.航运温室气体减排分析模型及燃料路径分析[J].中国航海,2026,49(2):144-152.

Hao J F, Zhao Z Q, Qiang Z X, et al. Shipping greenhouse gas emission reduction model and fuel path analysis[J]. Navigation of China, 2026, 49(2): 144-152. (in Chinese)

reduction route planning and fuel transition decision-making.

Key words: green shipping; fuel path optimization; techno-economic analysis; global fleet; methanol fuel; ammonia fuel

为应对气候变化,国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)于2018年提出了航运温室气体减排初步战略,战略目标^[1]是以2008年为基准年,至2030年碳排放强度至少降低40%,2050年争取降低70%,2050年国际航运的温室气体年度总排放量比2008年减少50%,至21世纪末国际航运逐步消除温室气体排放。针对目前以燃油等石化燃料为主的航运业现状,减少CO₂排放是重中之重。航运业如何满足越来越严苛的减碳要求,是航运大国和船东赢得航运市场的核心竞争力。

近年来,国内外研究机构对船队碳减排和燃料路径方面开展了大量研究,形成了一些侧重于不同研究方向的成果。2013年和2016年,LR分别发布了《Global Marine Fuel Trends》和《Low Carbon Pathways 2050》^[2-3],都是基于设定不同航运燃料场景进行全球航运碳排放量预测,考虑全球经济发展和燃料价格的影响,前者设定现状场景、全球共享场景和竞争壁垒场景,考察应用液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)和氢燃料在航运上的影响,后者设定常规场景、高氢可用性场景、高生物燃料可用性场景和高碳额购买的场景,考查氢燃料和生物燃料在航运上的影响;2020年,IMO发布《Fourth IMO GHG Study 2020》^[1],依据全球船队应用节能设备和燃料情况,定义了两个减碳场景,并对全球船队碳强度和碳减排等进行了分析;2020年,日本船舶技术协会发布《Roadmap to Zero Emission from International Shipping》^[4],给出了不同船型运力预测方法;2021年,中国船级社(CCS)发布《航运低碳发展展望2021》^[5],主要从法规、技术成熟度、环保特性和可获得性等方面提出了国内船队减碳路线,指出“能效技术措施贯穿始终,船舶清洁燃料担当减排C位”的观点;2020年,美国船级社(ABS)发布《Pathways to Sustainable Shipping》^[6],分析了LNG、甲醇和氨等燃料的特性,并简要描述了LNG、甲醇和氨燃料船型的未来设计方案;2022年,挪威船级社(DNV)发布《Maritime Forecast 2050》^[7],分析了船用燃料供应产业链情况,定义24条燃料路径,分析了各路径的优缺点和碳减排量。

以上研究成果从多角度分析了未来航运减碳的方向,替代燃料的应用是大势所趋,但目前缺少针对特定船队的,全面考虑船队发展、船队现状、建造成本、营运成本、燃料成本以及技术可用性等因素影响下的技术经济可行脱碳路径评估。因此,本文建立

了船队温室气体减排分析模型,包括碳排放量计算模块、减碳成本分析模块、碳强度计算模块,数据输入模块以及数据处理模块,对船队不同燃料路径进行分析优选。基于本模型,文中以全球船队为研究对象进行算例分析,筛选适用于全球船队的碳减排燃料路径,为制定航运减碳方案提供参考。

1 船队温室气体减排分析模型的建立

1.1 模型概述

船队温室气体减排分析模型,包括碳排放量计算模块、碳减排成本分析模块、碳强度计算模块三个计算模块,以及数据输入和数据输出两个辅助模块。其中,输入数据包括基准年船队、海运贸易、法规、燃料路径、船舶造价、燃料价格、减排技术和贴现率等,输出数据包括运力预测值、碳减排、碳强度、总成本和碳减排成本,可实现对船队的减碳总量、减碳成本、减碳强度的分析,进而获得优选的燃料路径。

本模型采用ASP.NET开发,可实现数据输入、计算过程和数据输出的可视化和图表化,可高效、清晰、简洁地完成数据的对比、关键节点的查询、各组数据之间的分析,模型架构如图1所示。



图1 船队温室气体减排分析模型架构

Fig.1 Architecture diagram of greenhouse gas emission reduction analysis model for fleet

1.2 输入数据模块

输入数据包括目标船队运力、船队成本、贴现率三个子模块。

1.2.1 船队运力子模块

本模型功能是针对目标船队,分析其近期、中期、远期的温室气体减排燃料路径,因此其船队运力包括历史数据和未来一段时期的预测数据,需建立合理的运力预测子模型。本子模型中基于国际海运贸易与社会经济指标相关的假设(GDP、人口和能源

消耗),利用这些指标为每种商品的贸易量建立一个回归模型,构建每个商品的贸易量回归模型,通过将2050年之前的社会经济指标预测值输入回归公式,就可以得出未来的贸易量(t/y)^[4]。为此,使用了经济合作与发展组织(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD)的GDP预测和国际应用系统分析研究所(International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA)的能源消耗和人口预测数据。模型中每种商品的海运贸易以(t·n mile)/y来表示,采用贸易量(t/y)乘以每种商品的平均航程进行估计。海上运力预测流程如图2所示。

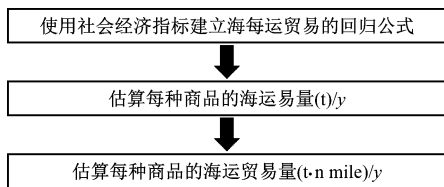


图2 海上运力预测流程

Fig. 2 Marine capacity prediction process

在创建回归公式时,依次使用线性曲线、线性对数曲线和 Logistic 曲线对解释变量和被解释变量进行拟合,其中,交易量为被解释变量,社会经济指标为解释变量^[4]。

线性曲线:

$$Y = aX + b \quad (1)$$

线性对数曲线:

$$\ln(Y) = a\ln(X) + b \quad (2)$$

Logistic 曲线:

$$Y = \frac{c}{1 + a\exp(-bX)} \quad (3)$$

其中, Y 是被解释变量, X 是解释变量(取自“SSP Database”), a , b , c 是参数^[4]。解释变量 X 包括石油消耗量、煤炭消耗量、燃气消耗量、人口和GDP等。石油消耗量作为原油、成品油、液化石油气(Liquefied Petroleum Gas, LPG)和化学品需求计算的解释变量;煤炭消耗、燃气消耗和人口分别作为煤炭、LNG、谷物需求计算的解释变量;GDP作为其他需求计算的解释变量。针对每一解释变量和被解释变量,分别采用上述三种方法建立回归公式,根据拟合度选取最优回归方程。

对于不同的目标船队,可根据特定区域具体的海运贸易与社会经济指标以及船队规划等修订船队运力预测曲线。

1.2.2 船队成本子模块

船队第 j 年总成本 P_{Aj} 包括建造成本 P_{Cj} 、营运

成本 P_{Oj} 和燃料成本 P_{Fj} ^[7-9]。

$$P_{Aj} = P_{Cj} + P_{Oj} + P_{Fj} \quad (4)$$

船队一段时间周期内的总成本 P_A :

$$P_A = \sum P_{Aj} \quad (5)$$

船队第 j 年船舶建造成本 P_{Cj} :

$$P_{Cj} = \sum P_{Ci} \times N_{\text{newship}-i} \quad (6)$$

其中, P_{Ci} 为第 j 年某 i 型船舶造价, $N_{\text{newship}-i}$ 为 i 型船舶的数量。

船队营运成本 P_{Oj} 提供了两种计算方法,分别为理论计算法和经验公式计算法:

船队营运成本 P_{Oj} 理论计算法:

$$P_{Oj} = \sum S_{Ojk} \quad (7)$$

其中, S_{Ojk} 为第 j 年某型船舶的营运费用, k 表示营运费用类型,包括船员费用、停航费用、润滑油成本、维修/保养成本、保险费用、管理费用和港口费用等。

如缺少实际营运费用数据,可采用如下经验公式进行估算:

$$P_{Oj} = P_{Cj-\text{all}} \times 0.05 \quad (8)$$

其中, $P_{Cj-\text{all}}$ 为第 j 年船队所运营船舶的总建造成本, $P_{Cj-\text{all}} = \sum P_{Ci} \times N_i$, P_{Ci} 为第 j 年某 i 型船舶造价, N_i 为 i 型船舶的数量。

燃料成本 P_{Fj} :

$$P_{Fj} = Q_{Fj} \times p_j \quad (9)$$

其中, Q_{Fj} 为第 j 年燃料消耗量, p_j 为第 j 年燃料价格。

燃料消耗量 Q_{Fj} 为依据船队初始年份的运力-燃料消耗量,以及未来年份运力需求情况,按比例对未来年份燃料消耗量进行的估算。

$$Q_{Fj} = \frac{Y_j}{Y_0} \cdot Q_{F0} \quad (10)$$

其中, Y_j 为第 j 年船队总运力, Y_0 为初始年份船队总运力, Q_{F0} 为初始年份燃料消耗量。

1.2.3 贴现率定义子模块

本模型中各项成本的计算和碳减排的计算均可选择是否考虑贴现率的影响^[10],相关公式为:

$$p_v = f_v / (1 + r)^n \quad (11)$$

其中, p_v 为现值, f_v 为期值, r 为利率, n 为期数。

1.3 碳排放量计算模块

燃料路径的定义:

根据燃料消耗量 Q_{Fj} ,按一定比例对各燃料进行分配,可根据船队对燃料的实际需求进行定义。

船队碳排放量 Q_{CEj} :

$$Q_{CEj} = Q_{Fj} \times C_F \quad (12)$$

其中, Q_{CEj} 为船队第 j 年碳排放量, Q_{Fj} 为第 j 年燃料

消耗量, C_F 为碳转换系数。

依据 ABS、CCS 等船级社发布的船舶燃料研究成果,船用重燃油(Heavy Fuel Oil, HFO)、船用柴油(Marine Diesel Oil, MDO)、LNG、甲醇和氨燃料等能源储罐到使用(Tank To Wheel, TTW)和开采到使用(Well To Wheel, WTW)的碳排放系数^[7-8]见表 1。其中,温室气体的排放量以二氧化碳当量(CO_{2e})为单位进行计量。

表 1 碳排放系数

Tab. 1 Carbon emission coefficient

燃料	单位:g/MJ		
	CO_2 (TTW)	CO_{2e} (TTW)	CO_{2e} (WTW)
HFO	77.5	77.6	87.2
MDO	75.1	76.1	93.5
LNG	57.3	59.6	78.1
甲醇(灰)	69.1	76.1	98.1
甲醇(蓝)	69.1	76.1	81.0
甲醇(绿)	69.1	76.1	22.2
氨(灰)	0	0	100.6
氨(蓝)	0	0	20.9
氨(绿)	0	0	22.2

船队一段时间周期内碳排放量 Q_{CE} :

$$Q_{CE} = \sum Q_{CEj} \quad (13)$$

1.4 碳减排成本分析模块

碳减排成本计算:

$$P_{DC} = (P_{newR} - P_{oriR}) / (Q_{CE-newR} - Q_{CE-oriR}) \quad (14)$$

其中, P_{DC} 为碳减排成本, P_{newR} 为绿色燃料路径成本, P_{oriR} 为石化燃料路径成本, $Q_{CE-newR}$ 为绿色燃料路径碳排放量, $Q_{CE-oriR}$ 为石化燃料路径碳排放量。

1.5 碳强度计算模块

鉴于船型之间的显著差异性, C_{II} 是指单个船舶按某一给定日历年内所排放的 CO_2 总质量(M)与所承担的运输功(W)之比, 计算如下^[11]:

$$C_{II} = M/W \quad (15)$$

在没有单个船舶实际年度运输功数据的情况下, 从其他可靠来源(如联合国贸易和发展会议)获得的总运输功可视为近似值。根据《Fourth IMO GHG Study 2020》^[1], 代表性船型指散货船、气体运输船、液货船、集装箱船、杂货船、冷藏货船和 LNG 运输船。

1.6 数据处理模块

本模块采用 ASP.NET 开发, 主要实现数据输

入、计算过程和数据输出的可视化和图表化, 可高效、清晰、简洁地完成数据的对比、关键节点的查询、每组数据之间的分析等, 便于分析评估。

2 全球船队航运燃料路径碳减排计算分析

采用上文“船队温室气体减排分析模型”, 以全球船队为目标, 以 IMO 温室气体减排初步战略为基准, 对全球航运的不同燃料路径减碳成本展开分析。

2.1 法规依据

本文中船队碳减排和碳强度评估以 IMO 温室气体减排初步战略为基础: 2030 年碳排放强度至少降低 40% (较 2008 年); 2050 年碳排放总量至少降低 50%, 碳排放强度至少降低 70% (较 2008 年)。

2.2 全球船队运力

2.2.1 全球船队主要船舶现状

根据克拉克森的统计数据, 2022 年末, 全球船队船舶统计数据如表 2 所示。全球船队主要以散货船、油船、集装箱船和普通货船为主, 其按载重吨计占比约 84%, 本文以上述四种船型为重点研究对象。

表 2 2022 年末全球船队主要船舶统计

Tab. 2 Statistics of major ships in the global fleet at the end of 2022

船舶类别	数量/艘次	载重吨/DWT
散货船	约 11 963	约 8.3×10^8
油船	约 8 380	约 5.0×10^8
集装箱船	约 5 312	约 2.7×10^8
普通货船	约 15 369	约 8.3×10^7
其他	约 71 393	约 2.9×10^8
合计	约 112 417	约 2.0×10^9

根据克拉克森船舶数据库, 对船舶造价进行分类统计, 各型船舶造价如图 3 所示。根据统计信息, 替代燃料船舶造价为: 甲醇燃料动力船舶造价增加 10% ~ 15%; LNG 燃料动力船舶造价增加约 15% ~ 30%; 氨燃料动力船舶造价与 LNG 相当。

2.2.2 全球船队运力预测场景选取

本文计算场景基于国际耦合模式比较计划第六阶段(CMIP6)定义的模式新情景(SSP-RCP)。其中, SSP 为共享的社会经济路径^[12], 包括 5 个场景; RCP 是一系列综合的浓缩和排放情景^[12], 用作 21 世纪人类活动影响下气候变化预测模型的输入参数, 以在未来人口、社会经济、科学技术、能源消耗和土地利用等方面发生变化时, 描述温室气体、反应性

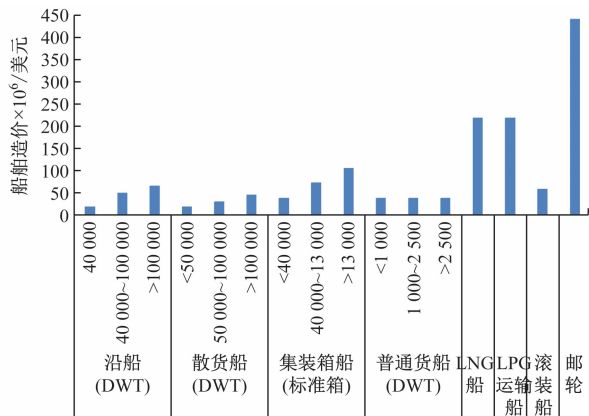


图 3 船舶造价统计

Fig. 3 Statistics of ship cost

气体、气溶胶的排放量,以及大气成分的浓度。RCP 和 SSP 的组合如表 3 所示。

IMO 第四次温室气体会议报告中指出^[1], 全球未来经济总体增长符合 SSP2 场景的基线预测, 本文选取 SSP2_RCP2.6 作为对全球运力预测的基础场景, 解释变量的取值来自“SSP Database”。

2.2.3 全球航运运力预测

基于 SSP2_RCP2.6 场景, 采用“运力预测子模块”对未来全球主要船舶运力发展情况进行了预测。2023 年, 全球总运力约为 $6.7 \times 10^{13} \text{ t} \cdot \text{n mile}$, 2050 年总运力较 2023 年增长 38.8%, 达到约 $9.3 \times 10^{13} \text{ t} \cdot \text{n mile}$, 如图 4 所示。

表 3 运输工作需求预测的特点

Tab. 3 Characteristics of transportation demand forecast

长期的社会经济情景	长期能源情景
SSP1 (可持续发展——走绿色之路)	RCP1.9 (1.5 °C) —— SSP1、SSP2、SSP5
SSP2 (中间道路——减缓和适应的中等挑战)	RCP2.6 (2 °C, 极低的温室气体排放) —— SSP1、SSP2、SSP4、SSP5
SSP3 (区域竞争——崎岖之路)	RCP3.4 (广泛脱碳) —— SSP1、SSP2、SSP3、SSP4、SSP5
SSP4 (不平等——道路分岔)	RCP4.5 (2.4 °C, 中低缓解或极低基线) —— SSP1、SSP2、SSP3、SSP4、SSP5
SSP5 (化石燃料驱动的发展——走高速公路)	RCP6.0 (2.8 °C, 中基线) —— SSP1、SSP2、SSP3、SSP4、SSP5

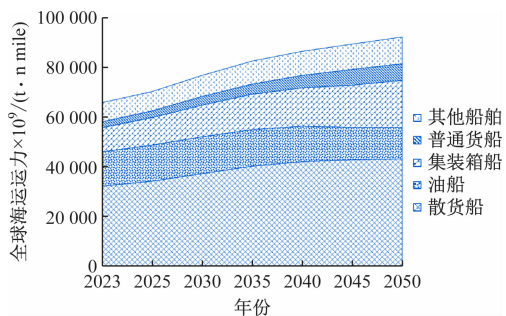


图 4 全球主要船型运力预测

Fig. 4 Forecast of global main ship type capacity

2.3 燃料消耗及绿色燃料路径设定

2.3.1 燃料消耗和价格

目前, 航运业的主要燃料为 HFO、MDO 和 LNG, 根据国际能源署 (International Energy Agency, IEA)^[13] 对海运能源消耗的预测, 全球船队对能源的需求如图 5 所示。

根据国际能源署和国际可再生能源署统计数据, 进行分析整理, 不同能源燃料的价格如图 6 所示。

2.3.2 节能减排技术应用

航运碳减排节能技术主要包括水动力节能、高效螺旋桨、轴带发电机、气层减阻、风力助推转子和碳捕捉等, 其中水动力节能、高效螺旋桨、轴带发电

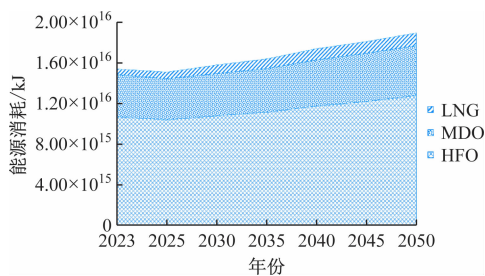


图 5 全球船队燃料消耗预测

Fig. 5 Global fleet fuel consumption forecast

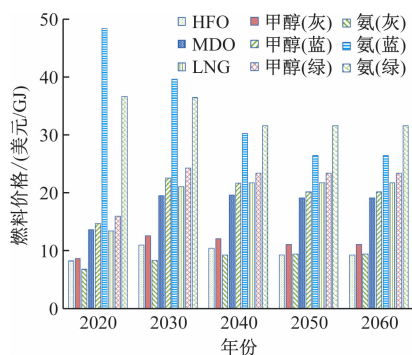


图 6 燃料价格

Fig. 6 Fuel price

机技术较为成熟, 可实现节能 1% ~ 6%, 以及温室气体减排 5% ~ 10% 的效果^{[9][14-15]}; 气层减阻和风力助推转子已逐步进入应用阶段, 可实现较高节能

和温室气体减排;碳捕捉技术暂无实船应用案例,考虑其具有较高的碳捕捉能力,最大可降低 50% ~ 85% 的温室气体排放量,船舶油耗预计增加 10% ~ 20%, 具有较大的应用前景。

根据 IMO、ABS、LR 等机构的相关研究成果^{[1][6-7][16-18]},分析预测主机功率限制(Engine Power Limitation, EPL)、尾部节能装置、辅助动力输出(Power Take Off, PTO)、气层/气泡减阻和风力助航等绿色节能技术在船舶建造中的应用渗透率,各项节能技术渗透率逐年增加。其中,EPL、尾部节能装置和 PTO 的技术渗透率最高,于 2050 年达到约 39%,气层减阻系统和风力助推转子技术渗透率于 2050 年达到约 32%,碳捕捉技术作为后起之秀,其技术渗透率将于 2060 年全面超越现有传统节能装置,达到约 48%,如图 7 所示。

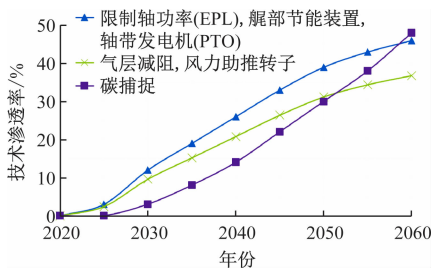


图 7 技术渗透率

Fig. 7 Technical permeability

2.3.3 绿色燃料路径设定

基于全球船队燃料消耗预测结果,根据未来可能存在的燃料需求场景,设定 18 条燃料路径,分别包括以 LNG、生物 LNG、蓝甲醇、绿甲醇、蓝氨、绿氨、蓝氢和绿氢等为主要燃料的燃料路径,并考虑了各燃料由灰-蓝-绿的转变过程。

路径 1/1A 为 IEA 预测的可能性最大的能源构成,2050 年石化燃料占 60%。分别考虑甲醇、LNG 和氨为主要燃料,形成了路径 2/2A ~ 4/4A,其中,路径 2/2A 为甲醇燃料占主导,由灰变绿,2050 年甲醇占 50%,路径 3/3A 为 LNG 燃料占主导,由灰变绿,2050 年 LNG 占比 50%,路径 4/4A 为氨燃料占主导,由灰变绿,2050 年氨占比 70%。路径 1/1A ~ 4/4A 细分了一般节能模式(1 ~ 4)和最大节能模式(1A ~ 4A),以路径 1 和 1A 为例,路径 1 为一般节能模式,选取 1 ~ 2 项节能措施,实现 10% 节能效果,路径 1A 为最大节能模式,选取 3 ~ 4 项节能措施,实现 30% 节能效果。

在路径 1/1A ~ 4/4A 基础上,为分析甲醇和氨占比不同所带来的影响,形成了针对上述三种燃料的细化路径 5A ~ 14A,上述路径均选取 3 ~ 4 项节能

措施,可实现约 30% 节能效果。

各燃料路径 2050 年燃料占比如图 8 所示。

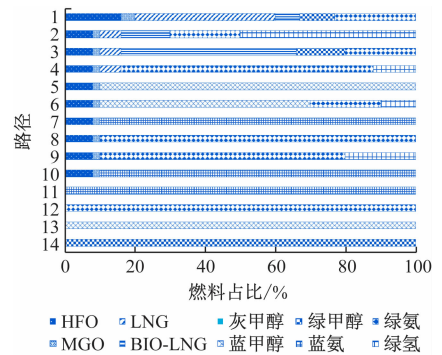


图 8 燃料路径-2050 年燃料消耗占比

Fig. 8 Fuel path-proportion of fuel consumption in 2050

以路径 1/1A、路径 2 ~ 4 和路径 12A 为例,燃料消耗定义如图 9 ~ 图 14 所示。BioLNG 为生物液化天然气。

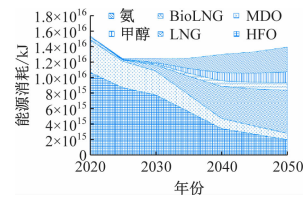


图 9 路径 1 船队燃料消耗

Fig. 9 Fleet fuel consumption for Path 1

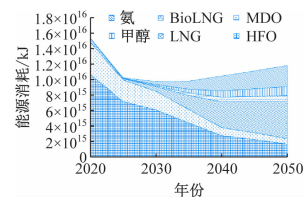


图 10 路径 1A 船队燃料消耗

Fig. 10 Fleet fuel consumption for Path 1A

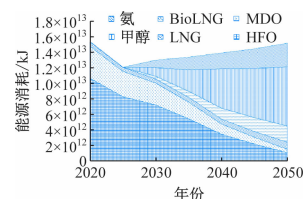


图 11 路径 2 船队燃料消耗

Fig. 11 Fleet fuel consumption for Path 2

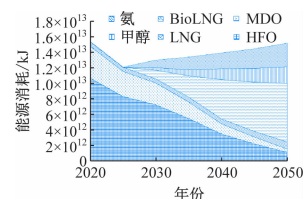


图 12 路径 3 船队燃料消耗

Fig. 12 Fleet fuel consumption for Path 3

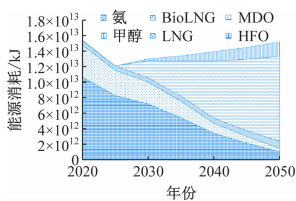


图 13 路径 4 船队燃料消耗

Fig. 13 Fleet fuel consumption for Path 4

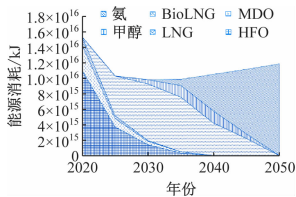


图 14 路径 12A 船队燃料消耗

Fig. 14 Fleet fuel consumption for Path 12A

2.4 全球船队温室气体减排量分析

2008 年,全球船队温室气体排放量约为 940 Mt^[1],为实现 IMO 温室气体减排目标,2050 年温室气体排放量预计需降低至 470 Mt。

采用船队温室气体减排分析模型的碳排放计算模块对全球船队的温室气体排放量进行了计算,计算结果表明,采用路径 1A、路径 2A、路径 3A、路径 4、路径 4A、路径 6A ~ 12A 和路径 14A,全球船队可实现温室气体排放较 2008 年降低 50% 的目标,其中,以氨为主燃料的路径 10A、11A 和 12A 可实现船端零排放。基于上述燃料路径的全球船队碳排放情况如图 15 所示。

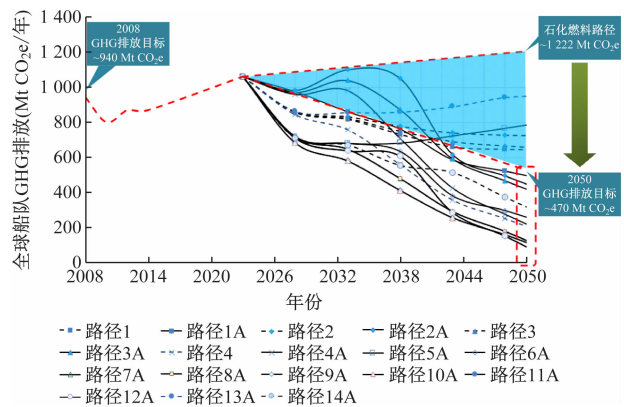


图 15 全球船队碳排放路线

Fig. 15 Global fleet carbon emission roadmap

2.5 船队碳强度评估

在船舶 CII 计算中,AER(Annual Efficiency Ratio,年度效率比)是用于衡量船舶营运碳强度的核心指标,基于上文建立的燃料路径,对 2023 ~ 2050 年船队碳强度进行了预测,以油船为例,预测结果(以路径 1A 和 12A 为例)如图 16 和图 17 所示。

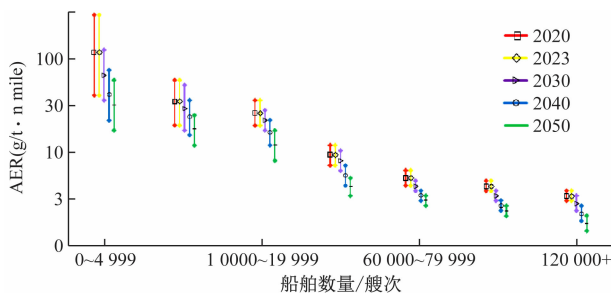


图 16 碳强度评估(油船,路径 1A)

Fig. 16 Carbon intensity assessment (oil tanker, Path 1A)

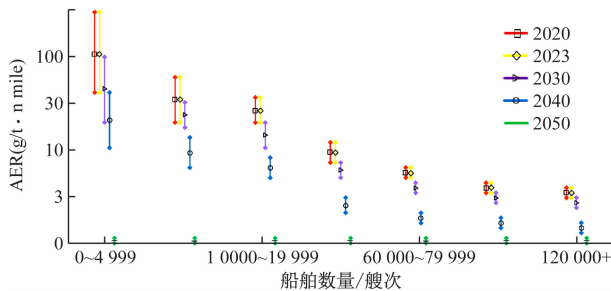


图 17 碳强度评估(油船,路径 12A)

Fig. 17 Carbon intensity assessment (oil tanker, Path 12A)

评估结果表明,基于燃料路径 1A 和 12A,2050 年船队碳强度较 2022 年可分别降低约 55% 和 100%。以绿氨为主燃料,可加快碳强度降低进程,并于 2050 年实现碳中和。

2.6 全球船队碳减排成本分析

采用船队温室气体减排分析模型的船队成本计算模块对全球船队的总成本和碳减排成本(均考虑了 5% 的贴现率)进行了计算,如图 18 和图 19 所示。

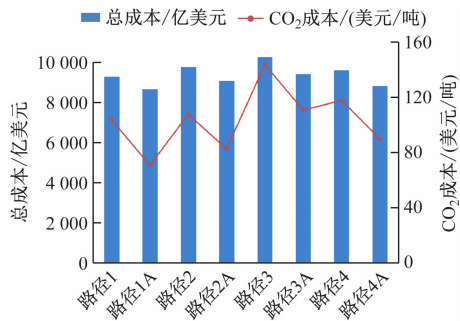


图 18 全球船队碳减排成本(路径 1 ~ 4)

Fig. 18 Global fleet carbon emission reduction costs (Path 1 ~ 4)

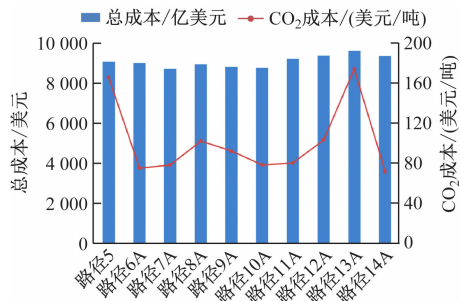


图 19 全球船队碳减排成本(路径 5A ~ 12A)

Fig. 19 Global fleet carbon emission reduction costs (Path 5A ~ 12A)

评估结果表明:

1) 最大程度采用节能措施,碳减排成本低于采用一般创新节能措施的路径;

2) 路径 1A 是可能性最大的一种能源情景,2050 年石化燃料(LNG、HFO/MGO) 仍然占比 60%,其他零碳/碳中性燃料适当应用,CO₂ 排放成本最低,但是减排量最小,满足当前 IMO 要求,如果 IMO 提高减碳要求,并严苛零碳/碳中性燃料应用比例,则不满足要求;

3) 路径 2、3、4 分别以甲醇、LNG、氨作为主要燃料,由灰变绿,以甲醇为主路径的减碳成本最低,氨路径略次之,以绿甲醇为主的路径优于 LNG 为主的路径;

4) 路径 5-14 聚焦到甲醇、氨的不同路径对比分析:路径 14A 由燃油过渡到绿甲醇,减碳成本最低;路径 6A 由燃油过渡到绿甲醇、绿氨次之;路径 7A、10A 最终过渡到蓝氨又次之;由燃油过渡到甲醇,并以蓝甲醇为终极燃料的路径减碳成本最高,且不足减碳总量要求;采用蓝氨和绿氨的减碳成本相当;甲醇路径对船舶建造、运营的影响最小;

5) 考虑到燃料发展的不确定性,绿甲醇和绿氨都有可能成为较优的燃料选择。

2.7 运力预测与 CO₂ 排放量预测值验证

本文中船队温室气体减排分析模型整体计算结果没有可验证的对标,但个别模块的计算结果可以与参考资料中相关部分进行比对验证。

2.7.1 运力预测验证

本模型运力预测值同“Maritime Forecast 2050”和“Fourth IMO GHG Study 2020”中的研究成果进行对比,以散货船、油船和集装箱船为例,详见图 20。结果表明,本文对近期和中期的散货船运力预测值与 IMO 预测值相近,远期位于 DNV 和 IMO 预测值之间;油船和集装箱船运力预测同 DNV 和 IMO 预测值基本相当。

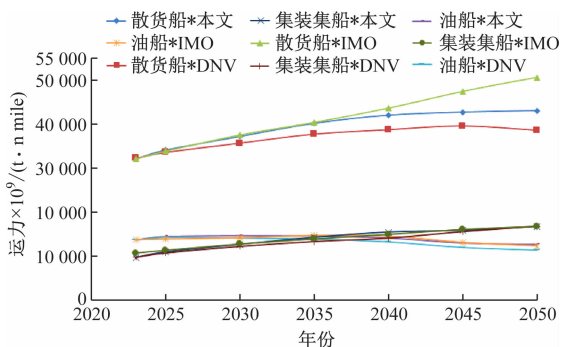


图 20 运力预测对比验证(DNV、IMO)

Fig. 20 Comparison and verification of predicted transportation capacity (DNV, IMO)

日本船舶技术研究协会于 2020 年发布“Roadmap to Zero Emission from International Shipping”,基于 OECD,SSP1/RCP4.5 场景对油船、散货船和集装箱船运力进行了预测。本模型基于此场景进行预测,误差在 2% 以内(2050 年预测误差最大,散货船误差为 1.9%,油船误差为 1.7%,集装箱船误差为 1.2%),造成该误差的主要原因为求解回归公式带来的差异,如图 21 所示。综上,本文预测方法的可靠性满足使用要求。

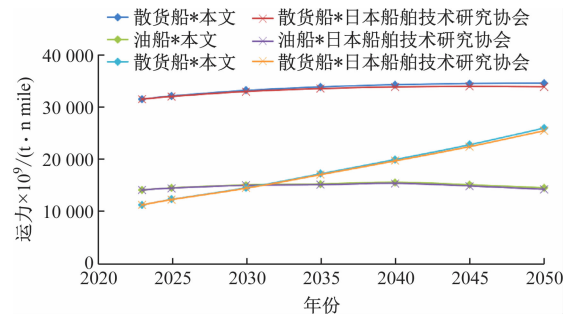


图 21 运力预测对比验证(日本)

Fig. 21 Comparison and verification of predicted transportation capacity (Japan)

2.7.2 CO₂ 排放量预测验证

本模型 CO₂ 排放量预测值(已考虑温室气体与 CO₂ 的转换系数)同“Maritime Forecast 2050”和“Fourth IMO GHG Study 2020”中的研究成果进行对比,详见图 22。结果表明,本文 CO₂ 排放量预测值位于 DNV 和 IMO 预测值之间,更接近 DNV 的预测值,本文预测方法的可靠性满足使用要求。

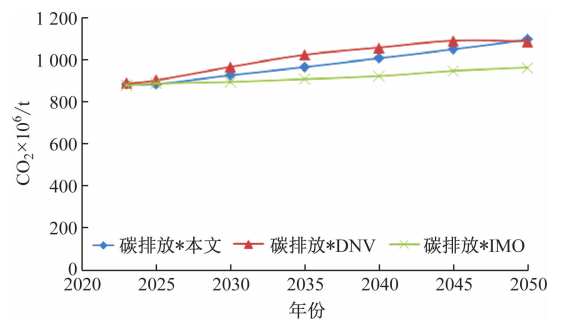


图 22 CO₂ 排放量预测对比

Fig. 22 Comparison of predicted CO₂ emissions

3 结束语

本文建立了船队温室气体减排分析模型,基于此模型对全球船队减碳燃料路径进行分析评估,通过不同燃料路径减碳成本和技术可行性的分析,提出了全球船队减碳的优选燃料路径,为航运减碳路线制定提供依据。主要结论:1) 路径 1A 是最可能的一种能源情景,满足当前 IMO 对碳减排和碳强度

的要求,如 IMO 提高减碳要求,则应考虑更加低碳的绿甲醇和氨燃料路径;2) 路径 2/2A ~ 4/4A 评估结果表明,为满足 IMO 对碳减排和碳强度的要求,甲醇和 LNG 路径须加大节能措施利用比例,而氨燃料路径采用一般节能措施即可;3) 碳减排经济性方面,以甲醇为主路径的减碳成本最低,氨燃料路径略次之,而 LNG 燃料路径经济性最差;4) 甲醇和氨燃料的细化路径中,以蓝甲醇为终极燃料的路径减碳成本最高,蓝氨和绿氨对减碳成本影响相当;5) 考虑到燃料发展的不确定性,且甲醇和氨燃料减碳成本接近,甲醇和氨燃料都具有较高的市场应用前景。

考虑到航运温室减排法规的发展,模型中将进一步考虑 CH₄ 等温室气体的影响,并根据技术的发展持续更新燃料价格、建造成本、营运成本、节能减排技术应用等输入数据,不断完善本模型,获得更准确、有效的分析结果。

参 考 文 献

- [1] IMO. Fourth IMO GHG study 2020 [R]. Delft, 2020: 1-524.
- [2] LR. Low carbon pathways 2050 [R]. London, 2022: 1-20.
- [3] LR. Global marine fuel trends [R]. London, 2022: 1-59.
- [4] Japan Ship Technology Research Association. Roadmap to zero emission from international shipping [R]. Tokyo, 2020: 1-136.
- [5] 中国船级社. 航运低碳发展展望 2021 [R]. 北京, 2021: 1-23.
China Classification Society. Prospects for low-carbon development of shipping in 2021 [R]. Beijing, 2021: 1-23. (in Chinese)
- [6] ABS. Pathways to sustainable shipping [R]. Spring, 2022: 1-107.
- [7] DNV. Maritime forecast 2050 [R]. Oslo, 2022: 1-83.
- [8] DNV. Energy transition outlook 2022 [R]. Oslo, 2022: 1-355.
- [9] DNV. DNV ETO main report 2022 [R]. Oslo, 2022: 1-28.
- [10] 甘爱平, 真虹. 我国航运低碳减排与碳金融交易的市场引导机制 [J]. 交通企业管理, 2016, 31 (12): 4-7.
- Gan A P, Zhen H. Market guidance mechanism for low-carbon emission reduction and carbon finance trading in China's shipping industry [J]. Transportation Enterprise Management, 2016, 31 (12): 4-17. (in Chinese)
- [11] 中国船级社. 2021 年相对于基线的营运碳强度折减因素指南 (CII 折减率指南, G3) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
China Classification Society. 2021 guidelines on the operational carbon Intensity reduction factors relative to reference lines (CII reduction factors guidelines, G3) [S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese)
- [12] 姜彤, 吕嫣冉, 黄金龙, 等. CMIP6 模式新情景 (SSP-RCP) 概述及其在淮河流域的应用 [J]. 气象科技进展, 2020, 10 (5): 102-109.
Jiang T, Lyu Y R, Huang J L, et al. New scenarios of CMIP6 model (SSP-RCP) and its application in the Huaihe River Basin, 2020, 10 (5): 102-109. (in Chinese)
- [13] IEA. World energy outlook 2021 [R]. Paris, 2022: 1-386.
- [14] 中国船级社. 船舶能源低碳发展趋势研究 [R]. 北京, 2021: 1-34.
China Classification Society. Research on the low-carbon development trend of ship energy [R]. Beijing, 2021: 1-34. (in Chinese)
- [15] 周伟新. 船舶能效设计指数 (EEDI) 第三阶段实施建议与现有船舶能效指数 (EEXI) 解析 [R]. 无锡, 2020: 1-69.
Zhou W X. Suggestions for the implementation of the third stage of the ship Energy Efficiency Design Index (EEDI) and analysis of the Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) [R]. Wuxi, 2020: 1-69. (in Chinese)
- [16] ABS. Methanol as marine fuel [R]. Spring, 2021: 1-28.
- [17] LR. Methanol and shipping Longspur Research [R]. London, 2022: 1-33.
- [18] IMO. Third IMO greenhouse gas study 2014 [R]. Delft, 2020: 1-295.